



Sitowise Oy

Valkiavaaran tuulivoimapuiston välkeseelvitys (VE1)

101020250-001

Tekijä
Mika Laitinen

pvm
02/11/2023

Osasto
Wind and Solar Finland

Projektinnumero
101020250-001

E-mail
mika.laitinen@afry.com

Raporttiversio
001

Asiakas

Sitowise Oy
Anna-Maria Kujala

Valkiavaaran tuulivoimapuiston välkeselvitys (VE1)

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	02.11.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	02.11.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen

Aineistojen käyttöoikeudet

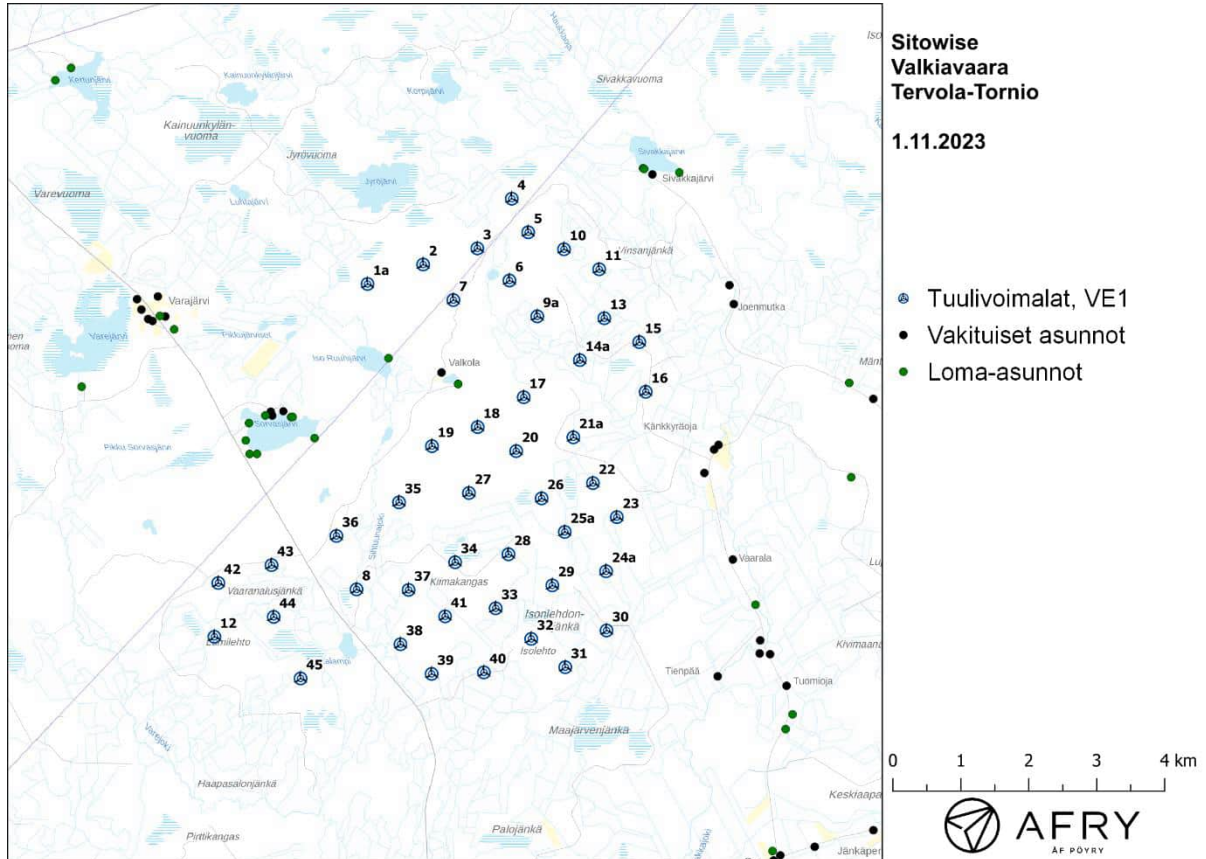
Selvityksessä on käytetty Maanmittauslaitoksen, Ilmatieteen laitoksen ja Luonnonvarakeskuksen avoimien aineistojen käyttöluvien alaista materiaalia, jotka on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>.

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	7
2.1	Välkevaikutus	7
2.2	Välkkeen rajoittaminen	7
2.3	Arvioinnin epävarmuudet	7
2.4	Ohjearvot	8
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus	9
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	9
3.2	Välkevaikutus	12
3.3	Puuston välkettä vähentävä vaikutus	16
3.4	Välkkeen yhteisvaikutukset	18
4	Yhteenveto	20
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	21
6	Viitteet	23

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Tervolan kunnan ja Tornion kaupungin alueelle suunnitellun Valkiavaaran tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi tehdään 45 voimalan suunnitelmalle VE1. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1). Mallinuksissa Valkiavaaran voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Valkiavaaran tuulivoimapuiston alueella.

Taulukko 1: Valkiavaaran suunnitelman VE1 tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

Voimala	E	N	Maaston korkeus [m]
1a	393569	7351252	150
2	394387	7351538	168
3	395185	7351775	154
4	395691	7352506	143
5	395934	7352012	153
6	395658	7351303	142
7	394832	7351016	142
8	393407	7346761	96
9a	396067	7350776	128
10	396461	7351763	130
11	396978	7351468	108
12	391316	7346063	107
13	397054	7350748	104
14a	396694	7350133	107
15	397568	7350397	99
16	397663	7349666	94
17	395868	7349587	139
18	395190	7349148	165
19	394517	7348868	180
20	395756	7348795	121
21a	396598	7348997	93
22	396886	7348324	103
23	397238	7347823	97
24a	397080	7347028	86
25a	396472	7347606	94
26	396131	7348099	102
27	395061	7348178	120
28	395643	7347277	97
29	396289	7346820	88



30	397086	7346156	77
31	396479	7345617	77
32	395978	7346033	93
33	395454	7346483	89
34	394858	7347160	104
35	394033	7348041	117
36	393111	7347547	108
37	394173	7346753	99
38	394054	7345954	92
39	394513	7345518	83
40	395281	7345540	75
41	394711	7346364	98
42	391373	7346855	110
43	392156	7347118	109
44	392188	7346356	100
45	392584	7345451	99

2 Tuulivoimaloiden välke

2.1 Välkevaikutus

Välkevaikutuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa Auringon paisteen ja tarkastelupisteen väliin jäävän voimalan lavat aiheuttavat välkkyvän varjon. Välke voi ulottua pisimmillään 1–3 km etäisyydelle voimalasta. Välkevaikutuksen etäisyyteen ja keston vaikuttavat tuulivoimalan korkeus ja roottorin halkaisija, vuoden- ja vuorokaudenaika, maaston muodot sekä näkyvyyttä rajoittavat tekijät kuten kasvillisuus ja pilvisuus.

Suomen sijainnin vuoksi yksittäisen tuulivoimalan välkevaikutus kohdistuu valtaosin voimalan pohjoispuolelle (päiväaika) sekä lounais- ja kaakkoispuolille (aamu- ja iltatimet). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

Välkevaikutuksen laskenta voi perustua joko teoreettisen maksimivälkkeen tai todennäköisen tilanteen mallinnukseen:

- Teoreettisen maksimivälkkeen laskennassa oletetaan, että päiväaikaan Aurinko paistaa jatkuvasti, tuulivoimalan roottori pyörii jatkuvasti, ja roottori on aina kohtisuorassa Aurinkoa kohden.
- Todennäköisen tilanteen mallinnuksessa otetaan huomioon paikallinen tilastollinen aineisto auringonpaisteen määrästä ja ajoittumisesta sekä tuulen suuntien ja nopeuksien jakautumisesta.

Tämän selvityksen väkelaskenta on tehty mallintamalla sekä todennäköinen välkeaika että teoreettinen maksimivälke.

2.2 Välkkeen rajoittaminen

Välkevaikutusta voidaan vähentää voimalakohtaisella välkkeen hallintatyökalulla (shadow flicker protection system), joka sisältää valoanturin ja välkkeenhallintasovelluksen. Työkalun avulla voimala voidaan pysäyttää joko havaitun auringonpaisteen perusteella ja/tai haluttuina vuoden- ja kellon-aikoina. Pysäytetty voimala ei aiheuta välkettä.

2.3 Arvioinnin epävarmuudet

Mallinnettu todennäköinen välkevaikutus edustaa todennäköistä tilannetta perustuen auringonpaisteen ja tuulisuuden tilastolliseen aineistoon. Yksittäisen vuoden sääolosuhteet saattavat poiketa merkittävästi keskimääräisistä olosuhteista, jolloin vuotuinen välkevaikutus voi poiketa mallinnetusta arvosta.

Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä lisää arvioinnin epävarmuutta. Mallinnuksen tuloksiin vaikuttaa myös käytettävien tausta-aineistojen tarkkuus ja mallintamisessa on tehtävä yleistyksiä liittyen puuston tiheyteen ja korkeuteen.

Rakennuksiin kohdistuvan välkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Todellisuudessa välkevaikutus kohdistuu rakennuksen sisätiloihin vain ikkunoiden suunnasta.

2.4 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [1]. Tässä selvityksessä välkeaikoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

Tanskassa on määritetty todennäköisen vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 tuntia. Ruotsissa vastaava todennäköisen välkkeen suositusarvo on 8 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä [2]. Saksassa todennäköisen vuotuisen välkkeen raja-arvo on 8 tuntia. Teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvot Saksassa ovat 30 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä.

3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola mallinnusohjelmistolla. Ohjelmiston laskentamalli huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoimalueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot. Laskennan tuloksena saadaan tieto siitä, kuinka monta tuntia vuodessa alueen eri kohteet ovat välkevaikutuksen alaisena. Tulosta havainnollistetaan tasa-arvokäyrästä, jonka perusteella voidaan arvioida varjostusvaikutusta tarkastelualueella.

Tarkastelualueiden maanpinnan korkeuserot on saatu Maanmittauslaitoksen aineistosta *Korkeusmalli 10 m*. Korkeusdatan vaakaresoluutio on 10 m ja pystysuorainen tarkkuus 1,4 m. Laskennassa huomioitiin korkeuserot siten, että jos Auringon, turbiinin ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Välkevaikutus laskettiin 2,0 m korkeudelle. Auringonpaistekulman rajana horisontista käytettiin kolmea astetta, jonka alle menevää säteilyä ei oteta huomioon varjostuksessa.

Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevaikutus huomioidaan mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Yleensä väkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä turbiinin napaa, ja lapa kapenee huomattavasti kärkeä kohti liikuttaessa. Tällä perusteella lavan tyven välkevaikutus ulottuu huomattavasti pidemmälle kuin lavan kärjen, mikäli arviointiperusteena käytetään Auringon peittoastetta. Tässä selvityksessä väkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili.

Väkelaskennassa Valkiavaaran voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloille on käytetty turbiinityypin SG170 6,2 MW lapaprofiilia skaalattuna roottorin halkaisijalle 200 m. Lapaprofiilia on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi. Skaalatun lavan maksimisileveys on 4,7 m. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätila (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat väkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua väketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksista [3] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammissa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny.

Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Rovaniemen sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [4]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 2: Suuntasektorikohtaiset osuudet yli 3 m/s tuulennopeuksille Suomen tuuliatlaksen perusteella.

Suuntasektori	0/180	30/210	60/240	90/270	120/300	150/330
Yli 3 m/s osuus	0,193	0,237	0,137	0,104	0,117	0,134

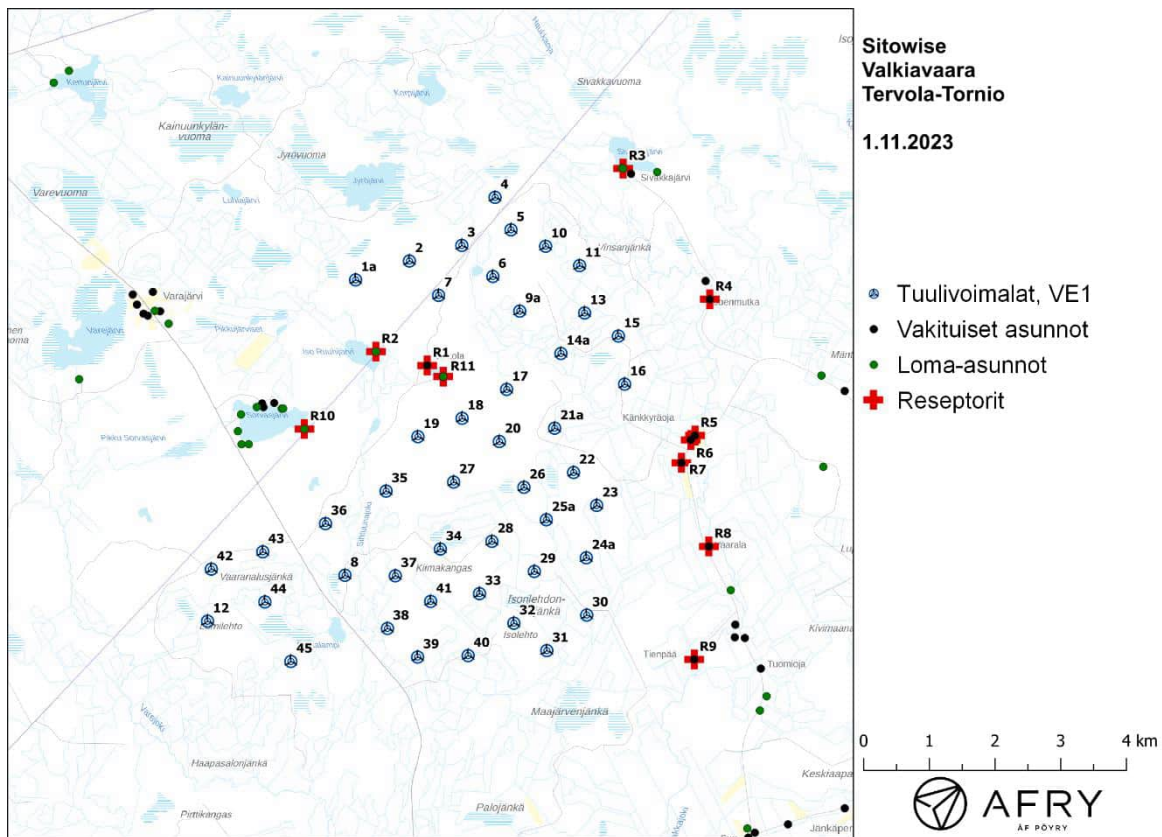
Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Rovaniemen sääasemalla.

Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,111
Helmikuu	0,246
Maaliskuu	0,363
Huhtikuu	0,436
Toukokuu	0,392
Kesäkuu	0,376
Heinäkuu	0,393
Elokuu	0,347
Syyskuu	0,285
Lokakuu	0,204
Marraskuu	0,107
Joulukuu	0,040

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 11 asuntoa, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Asuntojen sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Asunnot sijaitsevat 0,7–1,8 km etäisyydellä lähimmistä voimaloista. Kartoissa näkyvät vakituiset ja vapaa-ajan asuinrakennukset on ladattu Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta.

Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	394659	7349948	141	vakituinen asuinrakennus
R2	393879	7350159	118	loma-asunto
R3	397641	7352942	101	loma-asunto
R4	398960	7350955	79	vakituinen asuinrakennus
R5	398736	7348884	69	vakituinen asuinrakennus
R6	398670	7348816	70	vakituinen asuinrakennus
R7	398528	7348470	75	vakituinen asuinrakennus
R8	398946	7347198	72	vakituinen asuinrakennus
R9	398723	7345480	61	vakituinen asuinrakennus
R10	392791	7348983	123	loma-asunto
R11	394903	7349779	134	loma-asunto



Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

3.2 Välkevaikutus

Vuotuiset välkeajat mallinnettuna todennäköisenä välkevaikutuksena ja teoreettisena maksimivälkkeenä on esitetty karttakuvissa (Kuva 3 ja Kuva 4). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

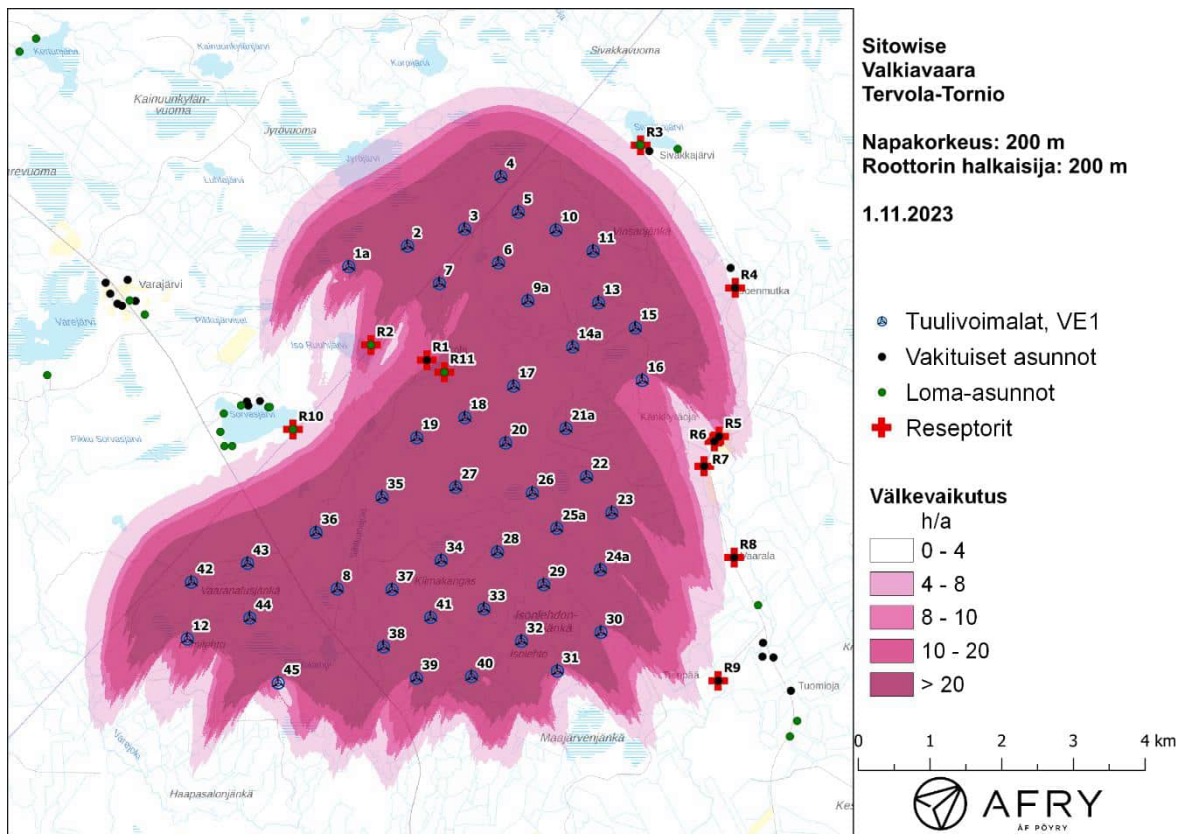
Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena arvona. Mallinnusten perusteella todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon kolmen asunnon kohdalla (reseptorit R1, R2 ja R11). Alueen muiden loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdilla todennäköinen vuotuinen välkeaika jää alle 8 ja 10 tunnin ohjearvon. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika jää alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla.

Vuotuinen teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon viiden asunnon kohdalla (reseptorit R1, R2, R5, R10 ja R11). Näiden asuntojen kohdilla ylittyy myös Saksan 30 minuutin raja-arvo teoreettisen maksimivälkkeen suurimmalle päiväkohtaiselle arvolle. Lisäksi 30 minuutin raja-arvo teoreettisen maksimivälkkeen suurimmalle päiväkohtaiselle arvolle ylittyy hieman myös reseptoreiden R6 ja R7 kohdalla. Reseptoreiden R1, R2 ja R11 kohdalla raja-arvojen ylitykset ovat merkittäviä, mutta reseptoreiden R5, R6, R7 ja R10 raja-arvojen ylitykset ovat vähäisiä. Lisäksi reseptoreiden R5, R6 ja R7 kohdalla suurin osa teoreettisesta maksimivälkkeestä esiintyy myöhään kesäiltoina, jolloin aurinko paistaa hyvin viistosti ja puusto voi rajoittaa välkevaikutusta merkittävästi. Reseptorin R10 kohdalla teoreettinen maksimivälke ajoittuu suurelta osin talvikuukausiin, jolloin auringonpaisteen todennäköisyys on pieni.

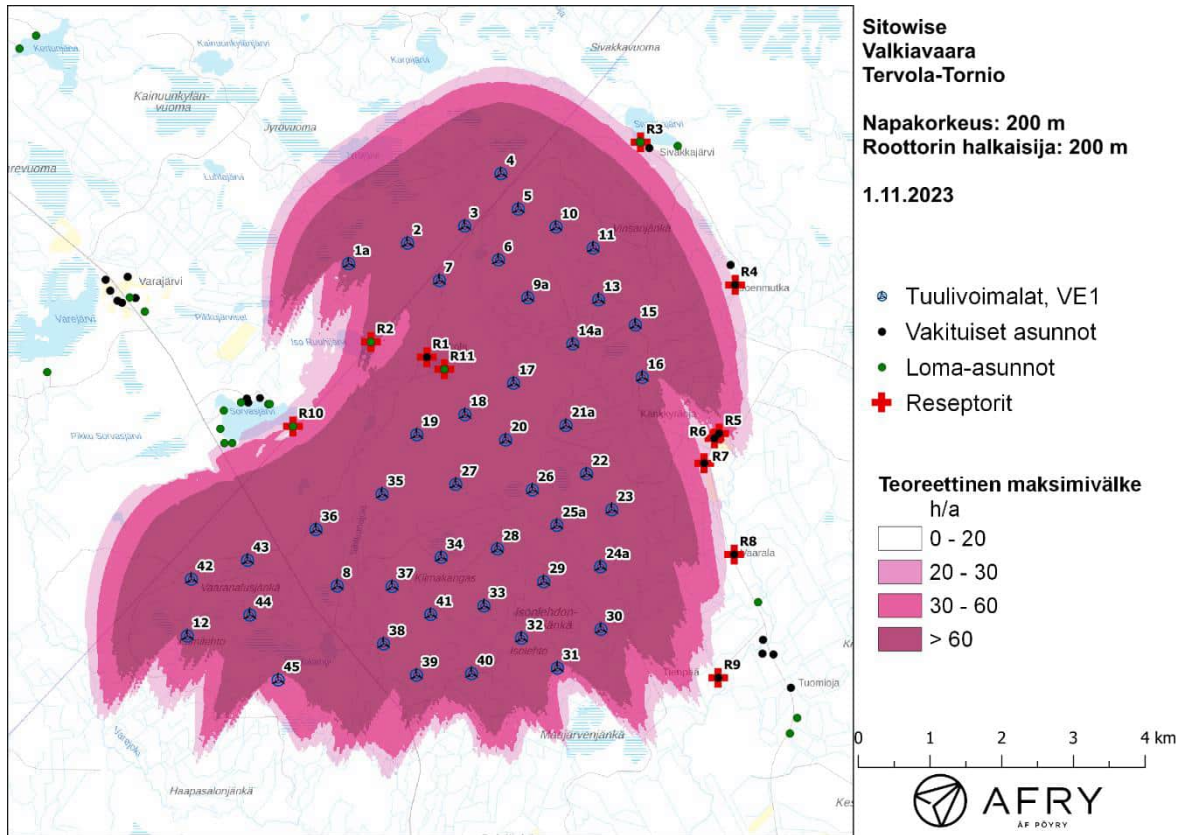
Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptoreiden R1, R2 ja R11 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6–Taulukko 8). Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen reseptoreiden R5 ja R10 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 9 ja Taulukko 10). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

Taulukko 5: Välkeajat reseptoreittain. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	18:48	0:18	116:39	1:34
R2	13:18	0:14	67:46	1:07
R3	3:25	0:05	21:50	0:21
R4	3:40	0:06	19:45	0:26
R5	5:50	0:06	30:24	0:35
R6	4:31	0:05	24:04	0:35
R7	4:32	0:07	24:12	0:32
R8	2:39	0:04	14:10	0:22
R9	3:02	0:04	15:15	0:21
R10	4:01	0:06	31:28	0:39
R11	27:39	0:25	152:50	2:00



Kuva 3: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus.



Kuva 4: Teoreettinen vuotuinen maksimivälke.

Taulukko 6: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R1 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03	0:06	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:11
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:23	1:25	1:49	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	3:52
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:30	1:00	1:44	0:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:38
Huhtikuu	0:00	0:00	0:12	0:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:24
Toukokuu	0:00	0:03	0:46	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:49
Kesäkuu	0:00	2:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:17
Heinäkuu	0:00	1:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:06
Elokuu	0:00	0:00	0:51	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:51
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	1:12	0:00	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:19
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:01	0:37	1:42	1:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:54
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03	0:13	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	3:26	1:50	1:54	2:03	5:14	4:03	0:18	0:00	0:00	0:00	0:00	18:48

Taulukko 7: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R2 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:15	0:55	0:03	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:12
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:11	0:25	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:36
Huhtikuu	0:00	0:00	0:14	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:14
Toukokuu	0:00	0:07	1:32	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:40
Kesäkuu	0:00	1:12	2:51	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:03
Heinäkuu	0:00	0:47	2:44	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:31
Elokuu	0:00	0:00	0:31	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:31
Syyskuu	0:00	0:00	0:01	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:01	0:24	0:37	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:02
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:12
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	2:06	7:53	0:21	1:04	1:36	0:18	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	13:18

Taulukko 8: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R11 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:15	0:15	1:06	0:00	0:00	0:00	0:00	2:37
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	1:14	0:05	5:15	0:00	2:07	0:00	0:00	0:00	0:00	8:40
Huhtikuu	0:00	0:00	0:13	2:13	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:27
Toukokuu	0:00	0:00	1:42	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:42
Kesäkuu	0:00	0:00	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:24	0:00	0:40
Heinäkuu	0:00	0:00	1:53	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03	0:00	1:56
Elokuu	0:00	0:00	0:16	0:13	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:29
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	2:17	0:00	2:06	0:06	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	4:36
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26	2:05	1:06	0:50	0:00	0:00	0:00	0:00	4:26
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:02	0:05	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	4:20	5:56	0:33	10:43	1:32	4:08	0:00	0:00	0:27	0:00	27:39

Taulukko 9: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R5 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:31	0:00	0:00	0:00	3:31
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:11	0:00	0:00	1:11
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:47	0:00	2:47
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	10:23	0:00	10:23
Heinäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:46	0:00	7:46
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:50	0:04	0:00	0:54
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:42	0:21	0:00	0:00	2:03
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04	1:46	0:00	0:00	0:00	1:49
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04	6:59	2:21	21:00	0:00	30:24

Taulukko 10: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R10 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:55	1:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:02
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	2:29	1:07	3:17	1:49	0:00	0:00	0:00	0:00	8:41
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	1:06	1:57	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:03
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	1:58	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:58
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Heinäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	3:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:04
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:42	3:43	0:57	0:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:28
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:29	1:44	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:13
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	0:00	6:49	8:09	8:27	6:14	1:49	0:00	0:00	0:00	0:00	31:28

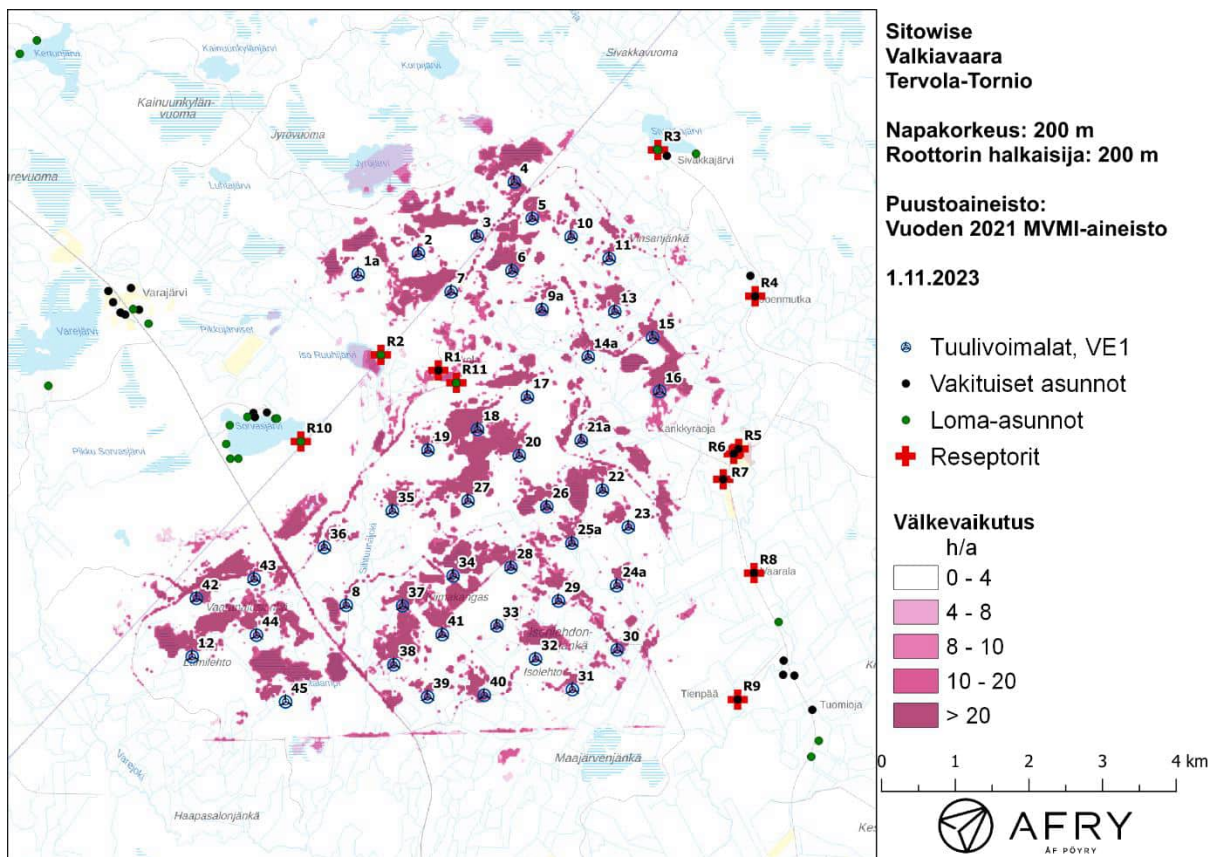
3.3 Puuston välkettä vähentävä vaikutus

Karttakuvassa (Kuva 5) on esitetty todennäköisen vuotuisen välkkeen mallinnus, kun puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioidaan. Puuston huomioivat vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat vertailukiinteistöjen kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 11). Laskennassa puustodatana on käytetty Luonnonvarakeskuksen tuottamaa monilähteen valtakunnan metsien inventoinnin puunkorkeus-aineistoa vuodelta 2021 (© Luonnonvarakeskus, 2023).

Mallinnusten perusteella puusto rajoittaa merkittävästi voimaloiden näkyvyyttä ja siten vähentää välkevaikutusta. Reseptorin R1 kohdalla todennäköinen välke ja teoreettinen maksivälke ylittää ohjearvot myös, kun puusto huomioidaan, mutta muiden asuntojen kohdilla puusto rajoittaa välkevaikutuksen ohjearvojen alle.

Taulukko 11: Välkeajat reseptoreittain, kun puusto huomioidaan. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	13:30	0:18	93:07	1:34
R2	0:00	0:00	0:00	0:00
R3	0:25	0:03	2:10	0:11
R4	1:35	0:05	8:34	0:23
R5	0:00	0:00	0:00	0:00
R6	0:00	0:00	0:00	0:00
R7	0:00	0:00	0:00	0:00
R8	0:14	0:02	1:18	0:09
R9	3:02	0:04	15:15	0:21
R10	0:00	0:00	0:00	0:00
R11	2:28	0:10	12:49	0:42



Kuva 5: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun puusto huomioidaan.

3.4 Välkkeen yhteisvaikutukset

Tässä luvussa arvioidaan Valkiavaaran voimaloiden ja läheisten tuulipuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia. Suomen ja Ruotsin mallinnusohjeiden [1][2] mukaan välkevaikutus ulottuu enintään 3 km etäisyydelle voimaloista. Yhteisvaikutusten arvioinnissa riittää siis mallintaa yhteisvaikutukset, kun eri puistojen voimaloiden etäisyys on alle 6 km. Tällä perusteella välkkeen yhteisvaikutusten arvioinnissa on huomioitu tuulivoimapaistot Kolopetäjä (suunnitelma VE1), Martimo ja Outojängä.

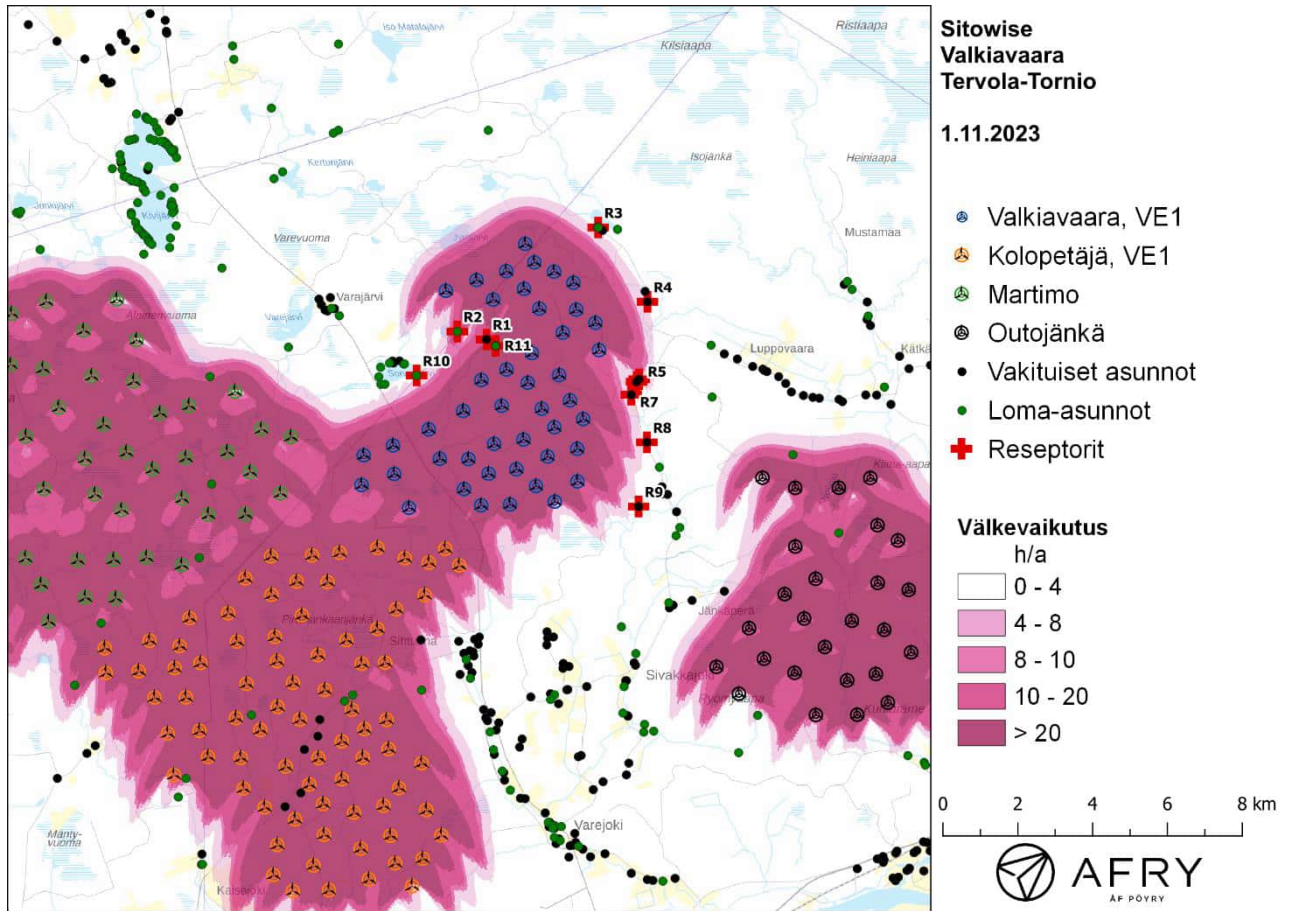
Mallinnuksissa Kolopetäjän ja Martimon voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m. Outojängän voimaloille on käytetty napakorkeutta 210 m. Näiden kolmen puiston voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja samaa lapaprofiilia kuin Valkiavaaran voimaloille.

Karttakuvassa (Kuva 6) on esitetty todennäköisen vuotuisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus. Yhteisvaikutusten vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat vertailukiinteistöjen kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 12). Mallinnusten perusteella Valkiavaaran, Kolopetäjän, Martimon ja Outojängän voimaloilla ei ole välkkeen yhteisvaikutuksia asutuksen kohdalla. Välkkeen yhteisvaikutuksia esiintyy paikoissa, joissa ei ole asuinrakennuksia.

Välkekartassa näkyy Kolopetäjän, Martimon ja Outojängän voimaloiden lähellä on asuntoja, joiden kohdalla todennäköinen välkevaikutus ylittää ohjearvot. Valkiavaaran voimalat ovat yli 3 km etäisyydellä näistä asunnoista, eivätkä aiheuta välkettä näiden asuntojen kohdalla.

Taulukko 12: Välkeajat reseptoreittain, kun mallinnuksissa huomioidaan tuulivoimapaistot Valkiavaara VE1, Kolopetäjä VE1, Outojängä ja Martimo. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	18:48	0:18	116:39	1:34
R2	13:18	0:14	67:46	1:07
R3	3:25	0:05	21:50	0:21
R4	3:40	0:06	19:45	0:26
R5	5:50	0:06	30:24	0:35
R6	4:31	0:05	24:04	0:35
R7	4:32	0:07	24:12	0:32
R8	2:39	0:04	14:10	0:22
R9	3:02	0:04	15:15	0:21
R10	4:01	0:06	31:28	0:39
R11	27:39	0:25	152:50	2:00



Kuva 6: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan tuulivoimapuistot Valkiavaara VE1, Kolopetäjä VE1, Outojätkä ja Martimo.

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Tervolan kunnan ja Tornion kaupungin alueille suunnitellun Valkiavaaran tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arvio on tehty 45 voimalan sijoitusuunnitelmalle VE1. Selvityksessä on arvioitu myös Valkiavaaran lähelle suunniteltujen tai rakennettujen tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon kolmen asunnon kohdalla. Muiden alueen asuntojen kohdalla todennäköinen vuotuinen välkeaika jää alle näiden ohjearvojen. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien asuntojen kohdalla.

Vuotuinen teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon viiden asunnon kohdalla. Näiden asuntojen kohdalla ylittyy myös Saksan 30 minuutin raja-arvo teoreettisen maksimivälkkeen suurimmalle päiväkohtaiselle arvolle. Lisäksi 30 minuutin raja-arvo teoreettisen maksimivälkkeen suurimmalle päiväkohtaiselle arvolle ylittyy hieman kahden muun asunnon kohdalla. Suurimmat teoreettisen maksimivälkkeen ylitykset tulevat kolmen asunnon kohdalla, joissa myös todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää ohjearvot. Muiden asuntojen kohdalla teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvojen ylitykset ovat vähäisiä.

Puuston sisältävän välkemallinnuksen perusteella puusto rajoittaa välkevaikutusta merkittävästi alueen asuntojen kohdalla, mutta yhden asunnon kohdalla välkevaikutus on melko suurta myös, kun puusto huomioidaan.

Mallinnusten mukaan Valkiavaaran ja läheisten tuulivoimapuistojen voimaloista ei aiheudu välkkeen yhteisvaikutuksia asutuksen kohdalla.

5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

Välkevaikutuksen laskennassa hyödynnetään taivaanpallon käsitettä, joka on maapallon maantieteellistä koordinaatistoa vastaava kuvitteellinen kuori katsottaessa maapallolta taivaalle. Samalla tavoin kuin paikan sijainti maapallolla voidaan ilmoittaa pituus- ja leveyspiirien avulla, voidaan taivaankappaleiden paikat taivaanpallolla ilmoittaa kahden koordinaatin (rektaskensio ja deklinaatio) avulla. Aurinko kulkee vuoden aikana taivaanpallolla kääntöpiirien väliin asettuvalla nauhalla, ja Auringon esiintymistiheys kyseisellä nauhalla voidaan esittää tiheysfunktiona.

Tiettyyn pisteeseen kohdistuvaa vuotuista välkevaikutusta laskettaessa tarkastellaan sitä osaa taivaanpallosta, joka näkyy pisteeseen tuulivoimaloiden roottorikehien läpi. Näkyvyyden arvioinnissa otetaan huomioon paikallinen maaston korkeusaineisto. Mikäli kääntöpiirien väliin asettuva nauha ei näy roottorikehien läpi, tarkastelupisteeseen ei kohdistu välkevaikutusta. Muussa tapauksessa yksittäisen turbiinin aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktioita turbiinin roottorikehien läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Turbiinien yhteisvaikutus saadaan summaamalla turbiinikohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen turbiinien eri orientaatioille, joita skaalataan suuntaakohtaisilla tuulusuusuksilla.

Huomioitaessa kuukausittaista (tai muuta lyhytaikaista) vaihtelua auringonpaisteen todennäköisyydessä, taivaanpallon nauha jaetaan vastaaviin osiin Auringon deklinaation mukaan. Tiheysfunktio määritellään näissä osissa erikseen, ja integroinnin tuloksia skaalataan kuukausikohtaisilla todennäköisyyksillä.

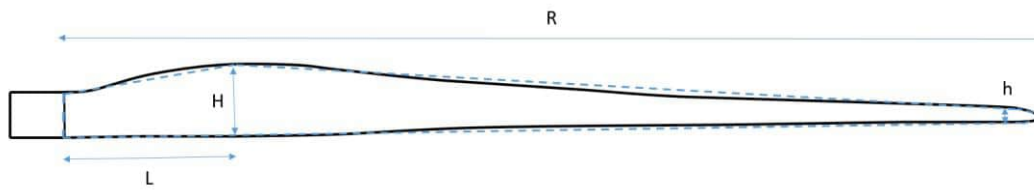
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevarjostus huomioidaan, mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Kun lavan leveys on w metriä, niin 20 % Auringon peittoon perustuvan välkevarjostuksen maksimietäisyyden määrittämiseen voidaan johtaa laskentakaava

$$\text{maksimietäisyys} = (5 * d * w) / 1'097'780,$$

missä d on etäisyys Aurinkoon (150'000'000 km). Yleensä välkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä turbiinin napaa ja lapa kapenee huomattavasti kärkeä kohti liikuttaessa. Tällä perusteella lavan tyven välkevaikutus ulottuu huomattavasti pidemmälle kuin lavan kärjen, mikäli arviointiperusteena käytetään Auringon peittoastetta.

Seuraavassa kaaviokuvassa (Kuva 7) on esitetty yksinkertaistettu malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on H etäisyydellä L lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on R ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on h . Lavan oletetaan kapenevan lineaarisesti arvosta H arvoon h liikuttaessa maksimikohdasta kärkeen. Tavanomaisesti välkelaskennassa turbiinin keskimääräinen leveys on määritetty parametrien H ja h keskiarvona.



Kuva 7: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin väkelaskennassa lavan leveys on määritetty useasta kohtaa lapaa, jolloin lavan muoto saadaan kuvattua vielä tarkemmin kuin kahteen leveysarvoon H ja h perustuvassa lineaarisessa approksimaatiossa. Tällä tavoin väkelaskennassa huomioidaan turbiinin muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.

6 Viitteet

- [1] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.
- [2] Boverket: Vindkraftshandboken, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [3] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [4] P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.



Sitowise Oy

Valkiavaaran tuulivoimapuiston väikeselvitys (VE2)

101020250-001

Tekijä
Mika Laitinen

pvm
02/11/2023

Osasto
Wind and Solar Finland

Projektinnumero
101020250-001

E-mail
mika.laitinen@afry.com

Raporttiversio
001

Asiakas

Sitowise Oy
Anna-Maria Kujala

Valkiavaaran tuulivoimapuiston välkeselvitys (VE2)

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	02.11.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	02.11.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen

Aineistojen käyttöoikeudet

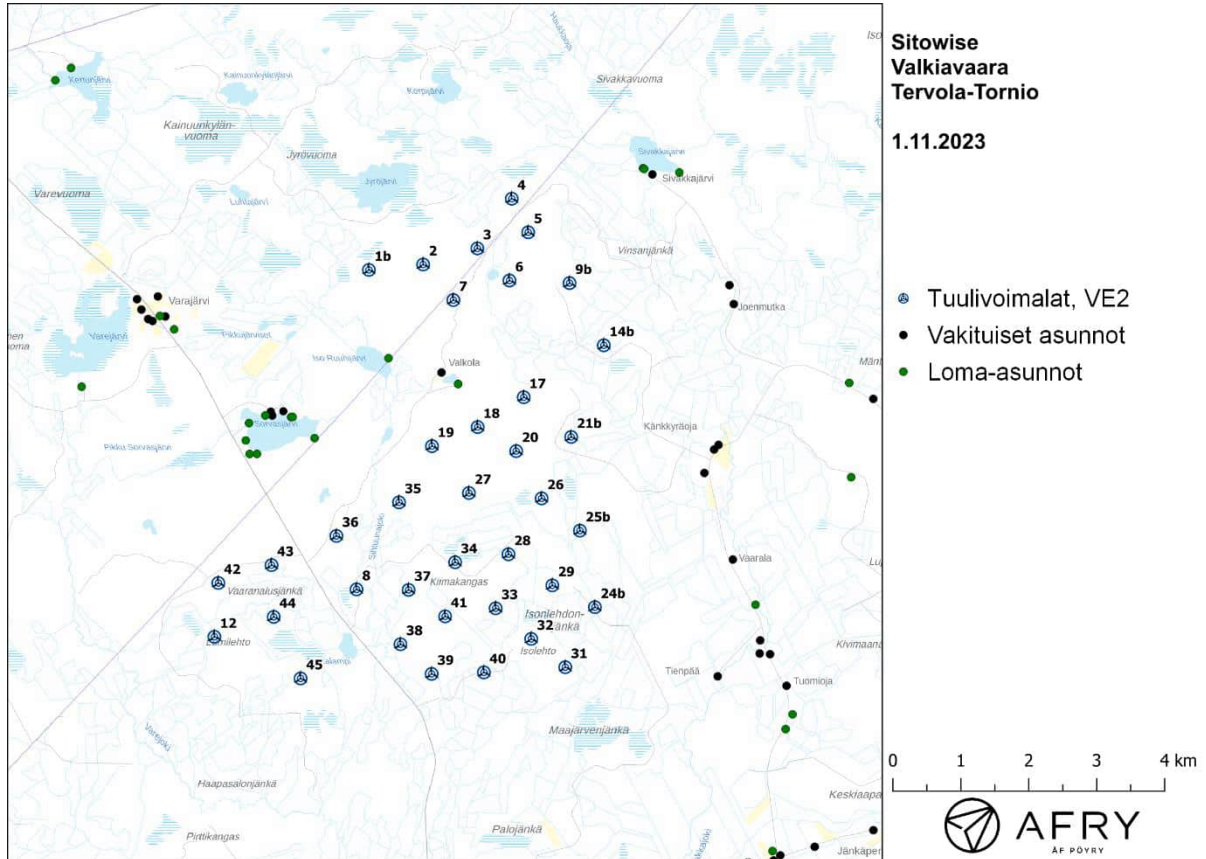
Selvityksessä on käytetty Maanmittauslaitoksen, Ilmatieteen laitoksen ja Luonnonvarakeskuksen avoimien aineistojen käyttö lupien alaista materiaalia, jotka on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>.

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	7
2.1	Välkevaikutus	7
2.2	Välkkeen rajoittaminen	7
2.3	Arvioinnin epävarmuudet	7
2.4	Ohjearovot	8
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus	9
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	9
3.2	Välkevaikutus	12
3.3	Puuston välkettä vähentävä vaikutus	16
4	Yhteenveto	18
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	19
6	Viitteet	21

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Tervolan kunnan ja Tornion kaupungin alueelle suunnitellun Valkiavaaran tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi tehdään 37 voimalan suunnitelmalle VE2. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1). Mallinuksissa Valkiavaaran voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Valkiavaaran tuulivoimapuiston alueella.

Taulukko 1: Valkiavaaran suunnitelman VE2 tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

Voimala	E	N	Maaston korkeus [m]
1b	393589	7351459	147
2	394387	7351538	168
3	395185	7351775	154
4	395691	7352506	143
5	395934	7352012	153
6	395658	7351303	142
7	394832	7351016	142
8	393407	7346761	96
9b	396542	7351265	119
12	391316	7346063	107
14b	397046	7350350	100
17	395868	7349587	139
18	395189	7349148	165
19	394517	7348868	180
20	395756	7348795	121
21b	396566	7349002	94
24b	396915	7346500	79
25b	396695	7347625	95
26	396131	7348099	102
27	395061	7348178	120
28	395643	7347277	97
29	396289	7346820	88
31	396479	7345617	77
32	395978	7346033	93
33	395454	7346483	89
34	394858	7347160	104
35	394033	7348041	117
36	393111	7347547	108
37	394173	7346753	99



38	394054	7345954	92
39	394513	7345518	83
40	395281	7345540	75
41	394711	7346364	98
42	391373	7346855	110
43	392156	7347118	109
44	392188	7346356	100
45	392584	7345451	99

2 Tuulivoimaloiden välke

2.1 Välkevaikutus

Välkevaikutuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa Auringon paisteen ja tarkastelupisteen väliin jäävän voimalan lavat aiheuttavat välkkyvän varjon. Välke voi ulottua pisimmillään 1–3 km etäisyydelle voimalasta. Välkevaikutuksen etäisyyteen ja kestoon vaikuttavat tuulivoimalan korkeus ja roottorin halkaisija, vuoden- ja vuorokaudenaika, maaston muodot sekä näkyvyyttä rajoittavat tekijät kuten kasvillisuus ja pilvisuus.

Suomen sijainnin vuoksi yksittäisen tuulivoimalan välkevaikutus kohdistuu valtaosin voimalan pohjoispuolelle (päiväaika) sekä lounais- ja kaakkoispuolille (aamu- ja iltatimet). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

Välkevaikutuksen laskenta voi perustua joko teoreettisen maksimivälkkeen tai todennäköisen tilanteen mallinnukseen:

- Teoreettisen maksimivälkkeen laskennassa oletetaan, että päiväaikaan Aurinko paistaa jatkuvasti, tuulivoimalan roottori pyörii jatkuvasti, ja roottori on aina kohtisuorassa Aurinkoa kohden.
- Todennäköisen tilanteen mallinnuksessa otetaan huomioon paikallinen tilastollinen aineisto auringonpaisteen määrästä ja ajoittumisesta sekä tuulen suuntien ja nopeuksien jakautumisesta.

Tämän selvityksen väkelaskenta on tehty mallintamalla sekä todennäköinen välkeaika että teoreettinen maksimivälke.

2.2 Välkkeen rajoittaminen

Välkevaikutusta voidaan vähentää voimalakohtaisella välkkeen hallintatyökalulla (shadow flicker protection system), joka sisältää valoanturin ja välkkeenhallintasovelluksen. Työkalun avulla voimala voidaan pysäyttää joko havaitun auringonpaisteen perusteella ja/tai haluttuina vuoden- ja kellon-aikoina. Pysäytetty voimala ei aiheuta välkettä.

2.3 Arvioinnin epävarmuudet

Mallinnettu todennäköinen välkevaikutus edustaa todennäköistä tilannetta perustuen auringonpaisteen ja tuulisuuden tilastolliseen aineistoon. Yksittäisen vuoden sääolosuhteet saattavat poiketa merkittävästi keskimääräisistä olosuhteista, jolloin vuotuinen välkevaikutus voi poiketa mallinnetusta arvosta.

Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä lisää arvioinnin epävarmuutta. Mallinnuksen tuloksiin vaikuttaa myös käytettävien tausta-aineistojen tarkkuus ja mallintamisessa on tehtävä yleistyksiä liittyen puuston tiheyteen ja korkeuteen.

Rakennuksiin kohdistuvan välkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Todellisuudessa välkevaikutus kohdistuu rakennuksen sisätiloihin vain ikkunoiden suunnasta.

2.4 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [1]. Tässä selvityksessä välkeaikoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

Tanskassa on määritetty todennäköisen vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 tuntia. Ruotsissa vastaava todennäköisen välkkeen suositusarvo on 8 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä [2]. Saksassa todennäköisen vuotuisen välkkeen raja-arvo on 8 tuntia. Teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvot Saksassa ovat 30 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä.

3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola mallinnusohjelmistolla. Ohjelmiston laskentamalli huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoimalueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot. Laskennan tuloksena saadaan tieto siitä, kuinka monta tuntia vuodessa alueen eri kohteet ovat välkevaikutuksen alaisena. Tulosta havainnollistetaan tasa-arvokäyrästä, jonka perusteella voidaan arvioida varjostusvaikutusta tarkastelualueella.

Tarkastelualueiden maanpinnan korkeuserot on saatu Maanmittauslaitoksen aineistosta *Korkeusmalli 10 m*. Korkeusdatan vaakaresoluutio on 10 m ja pystysuorainen tarkkuus 1,4 m. Laskennassa huomioitiin korkeuserot siten, että jos Auringon, turbiinin ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Välkevaikutus laskettiin 2,0 m korkeudelle. Auringonpaistekulman rajana horisontista käytettiin kolmea astetta, jonka alle menevää säteilyä ei oteta huomioon varjostuksessa.

Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevaikutus huomioidaan mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Yleensä väkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä turbiinin napaa, ja lapa kapenee huomattavasti kärkeä kohti liikuttaessa. Tällä perusteella lavan tyven välkevaikutus ulottuu huomattavasti pidemmälle kuin lavan kärjen, mikäli arviointiperusteena käytetään Auringon peittoastetta. Tässä selvityksessä väkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili.

Väkelaskennassa Valkiavaaran voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloille on käytetty turbiinityypin SG170 6,2 MW lapaprofiilia skaalattuna roottorin halkaisijalle 200 m. Lapaprofiilia on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi. Skaalatun lavan maksimisileveys on 4,7 m. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätila (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat väkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua väketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksista [3] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny.

Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Rovaniemen sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [4]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 2: Suuntasektorikohtaiset osuudet yli 3 m/s tuulennopeuksille Suomen tuuliatlaksen perusteella.

Suuntasektori	0/180	30/210	60/240	90/270	120/300	150/330
Yli 3 m/s osuus	0,193	0,237	0,137	0,104	0,117	0,134

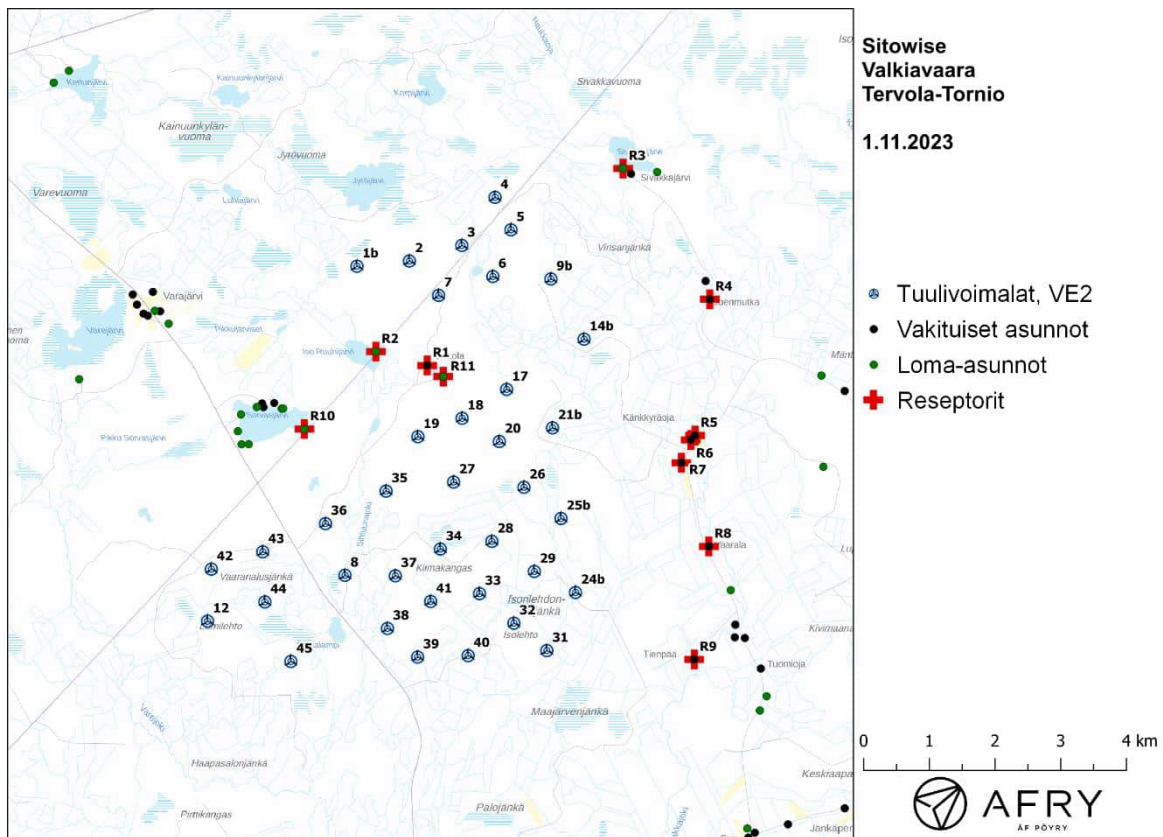
Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Rovaniemen sääasemalla.

Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,111
Helmikuu	0,246
Maaliskuu	0,363
Huhtikuu	0,436
Toukokuu	0,392
Kesäkuu	0,376
Heinäkuu	0,393
Elokuu	0,347
Syyskuu	0,285
Lokakuu	0,204
Marraskuu	0,107
Joulukuu	0,040

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 11 asuntoa, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Asuntojen sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Asunnot sijaitsevat 0,7–2,2 km etäisyydellä lähimmistä voimaloista. Kartoissa näkyvät vakituiset ja vapaa-ajan asuinrakennukset on ladattu Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta.

Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	394659	7349948	141	vakituinen asuinrakennus
R2	393879	7350159	118	loma-asunto
R3	397641	7352942	101	loma-asunto
R4	398960	7350955	79	vakituinen asuinrakennus
R5	398736	7348884	69	vakituinen asuinrakennus
R6	398670	7348816	70	vakituinen asuinrakennus
R7	398528	7348470	75	vakituinen asuinrakennus
R8	398946	7347198	72	vakituinen asuinrakennus
R9	398723	7345480	61	vakituinen asuinrakennus
R10	392791	7348983	123	loma-asunto
R11	394903	7349779	134	loma-asunto



Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapaiston hankealueella.

3.2 Välkevaikutus

Vuotuiset välkeajat mallinnettuna todennäköisenä välkevaikutuksena ja teoreettisena maksimivälkkeenä on esitetty karttakuvissa (Kuva 3 ja Kuva 4). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

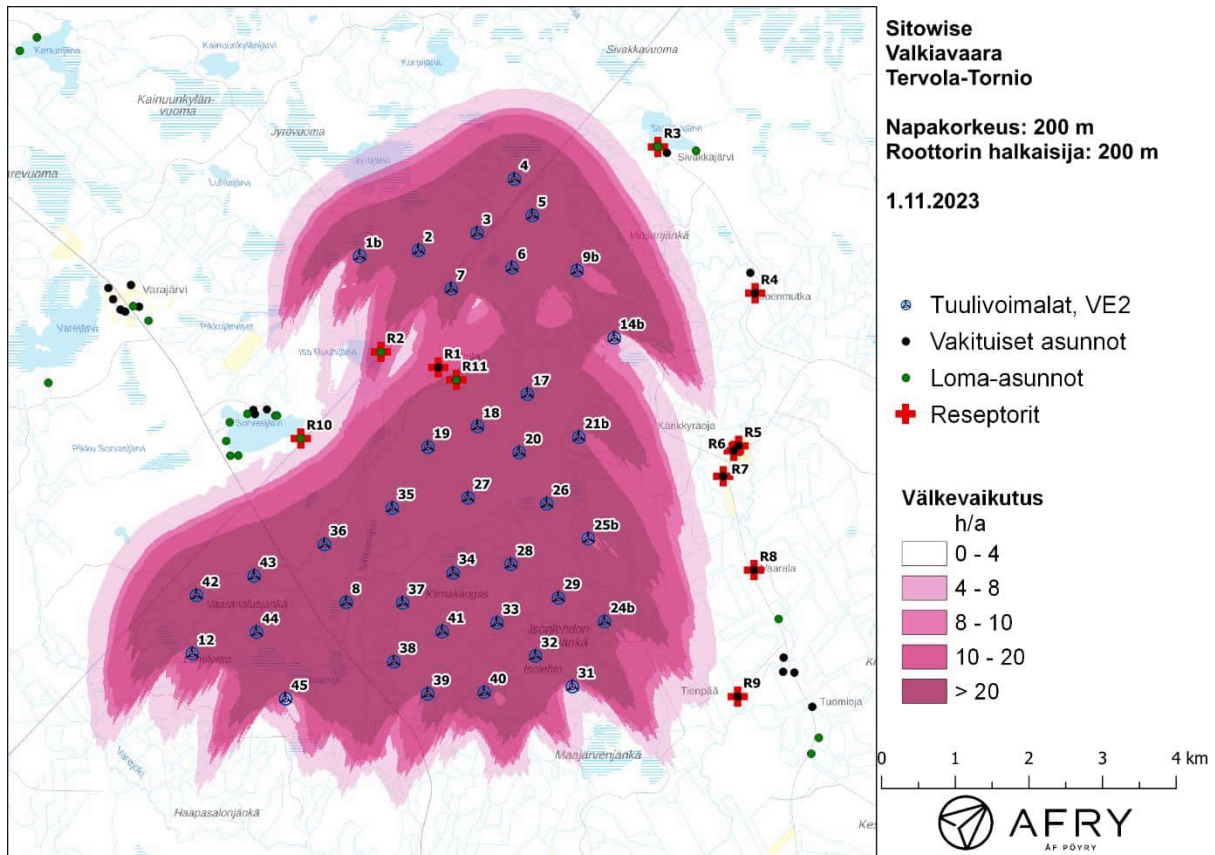
Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena arvona. Mallinnusten perusteella todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon kolmen asunnon kohdalla (reseptorit R1, R2 ja R11). Alueen muiden loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdilla todennäköinen vuotuinen välke aika jää alle 8 ja 10 tunnin ohjearvon. Todennäköinen päiväkohtainen välke aika jää alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla.

Vuotuinen teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon neljän asunnon kohdalla (reseptorit R1, R2, R10 ja R11). Näiden asuntojen kohdilla ylittyy myös Saksan 30 minuutin raja-arvo teoreettisen maksimivälkkeen suurimmalle päiväkohtaiselle arvolle. Reseptoreiden R1, R2 ja R11 kohdalla raja-arvojen ylitykset ovat merkittäviä, mutta reseptorin R10 kohdalla raja-arvojen ylitykset ovat vähäisiä. Lisäksi reseptorin R10 kohdalla teoreettinen maksimivälke ajoittuu suurelta osin talvikuukausiin, jolloin auringonpaisteen todennäköisyys on pieni.

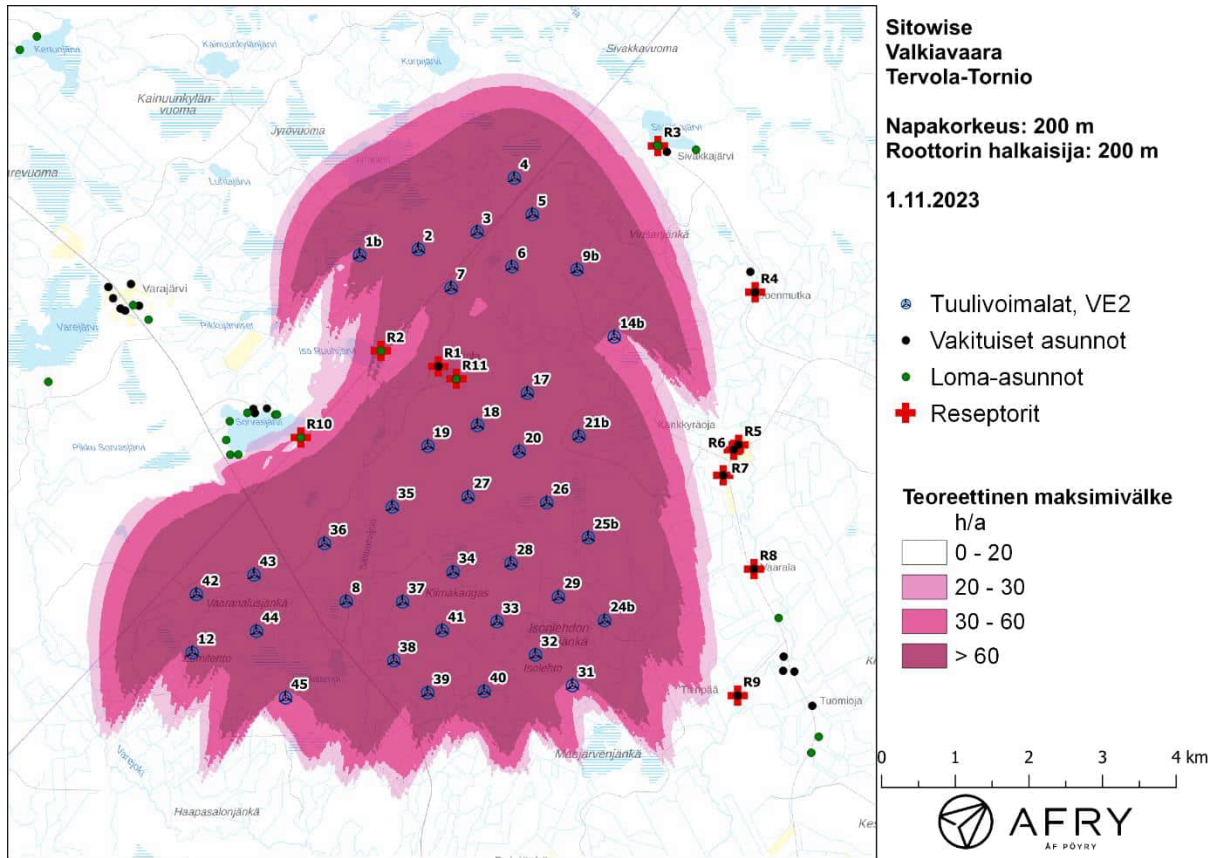
Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptoreiden R1, R2 ja R11 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6–Taulukko 8). Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen reseptorin R10 kohdalla on esitetty taulukoissa (Taulukko 9). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

Taulukko 5: Välkeajat reseptoreittain. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	17:15	0:18	109:22	1:34
R2	12:53	0:14	65:53	1:07
R3	1:35	0:03	9:14	0:14
R4	0:48	0:03	4:11	0:13
R5	2:13	0:03	11:03	0:12
R6	2:09	0:03	10:40	0:15
R7	1:25	0:03	7:21	0:14
R8	0:48	0:03	4:05	0:12
R9	1:12	0:03	6:17	0:13
R10	4:01	0:06	31:28	0:39
R11	23:17	0:25	134:10	2:00



Kuva 3: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus.



Kuva 4: Teoreettinen vuotuinen maksimivälke.

Taulukko 6: Todennäköisen väelkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R1 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03	0:06	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:11
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:23	1:25	1:49	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	3:53
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:24	1:00	1:44	0:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:32
Huhtikuu	0:00	0:00	0:02	0:09	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:11
Toukokuu	0:00	0:03	0:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:18
Kesäkuu	0:00	2:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:17
Heinäkuu	0:00	1:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:06
Elokuu	0:00	0:00	0:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:15
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	1:05	0:00	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:12
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:01	0:38	1:42	1:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:55
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03	0:13	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	3:26	0:31	1:39	2:04	5:14	4:03	0:18	0:00	0:00	0:00	0:00	17:15

Taulukko 7: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R2 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:15	0:55	0:03	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:12
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:11	0:25	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:35
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Toukokuu	0:00	0:07	1:32	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:40
Kesäkuu	0:00	1:12	2:51	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:03
Heinäkuu	0:00	0:47	2:44	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:31
Elokuu	0:00	0:00	0:21	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:21
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:01	0:24	0:37	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:02
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:12
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	2:06	7:28	0:21	1:04	1:36	0:18	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	12:53

Taulukko 8: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R11 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:15	0:15	1:06	0:00	0:00	0:00	0:00	2:37
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	1:14	0:06	5:15	0:00	2:07	0:00	0:00	0:00	0:00	8:41
Huhtikuu	0:00	0:00	0:15	1:42	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:59
Toukokuu	0:00	0:00	0:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:25
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Heinäkuu	0:00	0:00	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:16
Elokuu	0:00	0:00	0:12	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:19
Syyskuu	0:00	0:00	0:07	2:01	0:00	2:06	0:06	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	4:27
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26	2:05	1:06	0:50	0:00	0:00	0:00	0:00	4:27
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:02	0:05	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	1:13	5:05	0:34	10:43	1:32	4:08	0:00	0:00	0:00	0:00	23:17

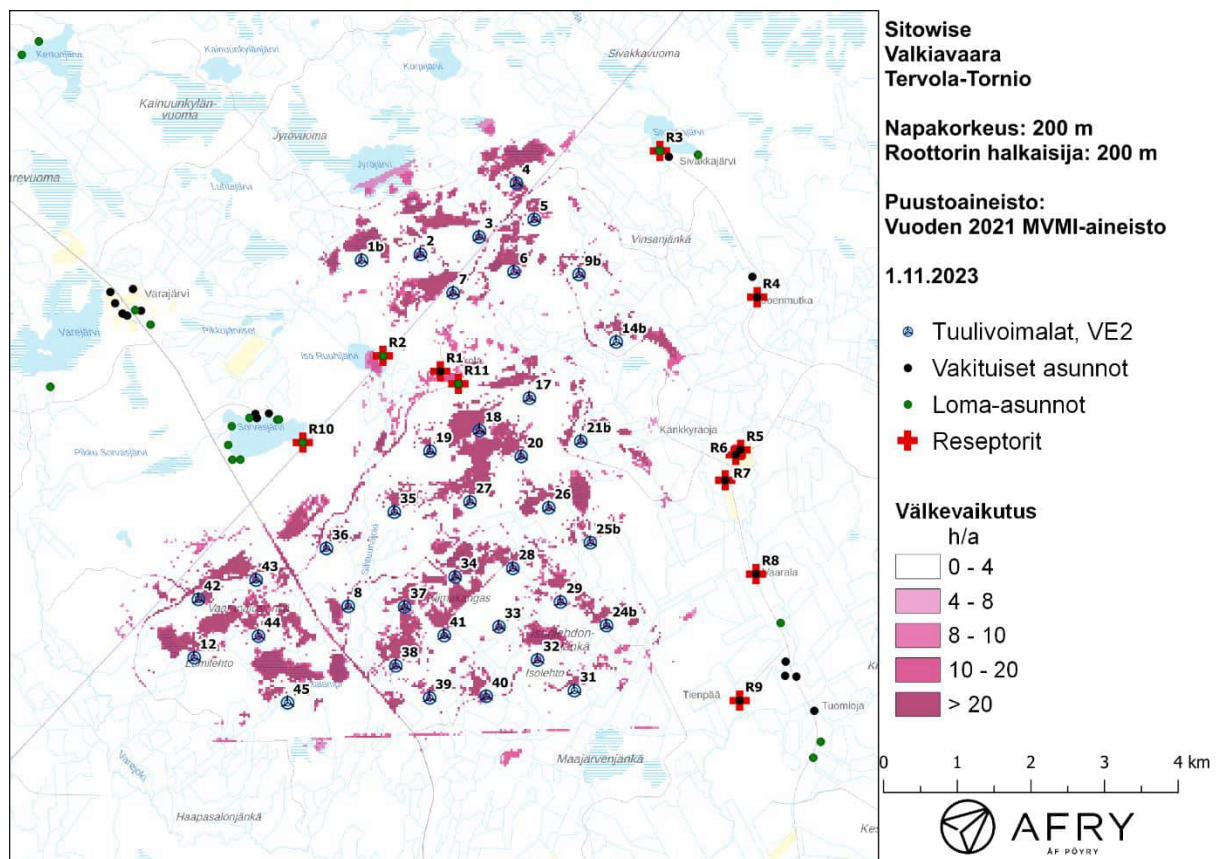
Taulukko 9: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R10 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:55	1:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:02
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	2:29	1:07	3:17	1:49	0:00	0:00	0:00	0:00	8:41
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	1:06	1:57	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:03
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	1:58	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:58
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Heinäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	3:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:04
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:42	3:43	0:57	0:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:28
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:29	1:44	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:13
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	0:00	6:49	8:09	8:27	6:14	1:49	0:00	0:00	0:00	0:00	31:28

3.3 Puuston välkettä vähentävä vaikutus

Karttakuvassa (Kuva 5) on esitetty todennäköisen vuotuisen välkkeen mallinnus, kun puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioidaan. Puuston huomioivat vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat vertailukiinteistöjen kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 10). Laskennassa puustodatana on käytetty Luonnonvarakeskuksen tuottamaa monilähteen valtakunnan metsien inventoinnin puunkorkeus-aineistoa vuodelta 2021 (© Luonnonvarakeskus, 2023).

Mallinnusten perusteella puusto rajoittaa merkittävästi voimaloiden näkyvyyttä ja siten vähentää välkevaikutusta. Reseptorin R1 kohdalla todennäköinen välke ja teoreettinen maksivälke ylittää ohjearvot myös kun puusto huomioidaan. Reseptorin R11 kohdalla teoreettisen maksimivälkkeen päiväkohtainen arvo ylittää vielä 30 minuutin ohjearvon. Muilta osin välkeajat asuntojen kohdilla jäävät ohjearvojen alle puuston huomioivassa laskennassa.



Kuva 5: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun puusto huomioidaan.

Taulukko 10: Välkeajat reseptoreittain, kun puusto huomioidaan. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	12:58	0:18	90:46	1:34
R2	0:00	0:00	0:00	0:00
R3	0:25	0:03	2:10	0:11
R4	0:04	0:01	0:22	0:05
R5	0:00	0:00	0:00	0:00
R6	0:00	0:00	0:00	0:00
R7	0:00	0:00	0:00	0:00
R8	0:00	0:00	0:00	0:00
R9	1:12	0:03	6:17	0:13
R10	0:00	0:00	0:00	0:00
R11	2:28	0:10	12:49	0:42

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Tervolan kunnan ja Tornion kaupungin alueille suunnitellun Valkiavaaran tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arvio on tehty 37 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE2.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon kolmen asunnon kohdalla. Muiden alueen asuntojen kohdalla todennäköinen vuotuinen välkeaika jää alle näiden ohjearvojen. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien asuntojen kohdalla.

Vuotuinen teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon neljän asunnon kohdalla. Näiden asuntojen kohdalla ylittyy myös Saksan 30 minuutin raja-arvo teoreettisen maksimivälkkeen suurimmalle päiväkohtaiselle arvolle. Suurimmat teoreettisen maksimivälkkeen ylitykset tulevat kolmen asunnon kohdalla, joissa myös todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää ohjearvot. Kolmannen asunnon kohdalla teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvojen ylitykset ovat vähäisiä.

Puuston sisältävän välkemallinnuksen perusteella puusto rajoittaa välkevaikutusta merkittävästi alueen asuntojen kohdalla, mutta yhden asunnon kohdalla välkevaikutus on melko suurta myös kun puusto huomioidaan.

5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

Välkevaikutuksen laskennassa hyödynnetään taivaanpallon käsitettä, joka on maapallon maantieteellistä koordinaatistoa vastaava kuvitteellinen kuori katsottaessa maapallolta taivaalle. Samalla tavoin kuin paikan sijainti maapallolla voidaan ilmoittaa pituus- ja leveyspiirien avulla, voidaan taivaankappaleiden paikat taivaanpallolla ilmoittaa kahden koordinaatin (rektaskensio ja deklinaatio) avulla. Aurinko kulkee vuoden aikana taivaanpallolla kääntöpiirien väliin asettuvalla nauhalla, ja Auringon esiintymistiheys kyseisellä nauhalla voidaan esittää tiheysfunktiona.

Tiettyyn pisteeseen kohdistuvaa vuotuista välkevaikutusta laskettaessa tarkastellaan sitä osaa taivaanpallosta, joka näkyy pisteeseen tuulivoimaloiden roottorikehien läpi. Näkyvyyden arvioinnissa otetaan huomioon paikallinen maaston korkeusaineisto. Mikäli kääntöpiirien väliin asettuva nauha ei näy roottorikehien läpi, tarkastelupisteeseen ei kohdistu välkevaikutusta. Muussa tapauksessa yksittäisen turbiinin aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktioita turbiinin roottorikehien läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Turbiinien yhteisvaikutus saadaan summaamalla turbiinikohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen turbiinien eri orientaatioille, joita skaalataan suuntaakohtaisilla tuulusuusuksilla.

Huomioitaessa kuukausittaista (tai muuta lyhytaikaista) vaihtelua auringonpaisteen todennäköisyydessä, taivaanpallon nauha jaetaan vastaaviin osiin Auringon deklinaation mukaan. Tiheysfunktio määritellään näissä osissa erikseen, ja integroinnin tuloksia skaalataan kuukausikohtaisilla todennäköisyyksillä.

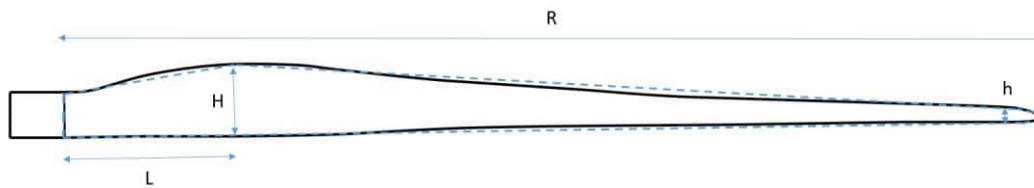
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevarjostus huomioidaan, mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Kun lavan leveys on w metriä, niin 20 % Auringon peittoon perustuvan välkevarjostuksen maksimietäisyyden määrittämiseen voidaan johtaa laskentakaava

$$\text{maksimietäisyys} = (5 * d * w) / 1'097'780,$$

missä d on etäisyys Aurinkoon (150'000'000 km). Yleensä välkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä turbiinin napaa ja lapa kapenee huomattavasti kärkeä kohti liikuttaessa. Tällä perusteella lavan tyven välkevaikutus ulottuu huomattavasti pidemmälle kuin lavan kärjen, mikäli arviointiperusteena käytetään Auringon peittoastetta.

Seuraavassa kaaviokuvassa (Kuva 6) on esitetty yksinkertaistettu malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on H etäisyydellä L lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on R ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on h . Lavan oletetaan kapenevan lineaarisesti arvosta H arvoon h liikuttaessa maksimikohdasta kärkeen. Tavanomaisesti välkelaskennassa turbiinin keskimääräinen leveys on määritetty parametrien H ja h keskiarvona.



Kuva 6: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin välkelaskennassa lavan leveys on määritetty useasta kohtaa lapaa, jolloin lavan muoto saadaan kuvattua vielä tarkemmin kuin kahteen leveysarvoon H ja h perustuvassa lineaarisessa approksimaatiossa. Tällä tavoin välkelaskennassa huomioidaan turbiinin muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.

6 Viitteet

- [1] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.
- [2] Boverket: Vindkraftshandboken, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [3] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [4] P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.